

舌骨上筋群の継続的反復収縮誘発を可能とする嚥下障害治療用磁気刺激装置の開発

著者	森 仁
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第19213号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00130537

氏 名	もり ひとし 森 仁
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械機能創成専攻
学 位 論 文 題 目	舌骨上筋群の継続的反复収縮誘発を可能とする 嚥下障害治療用磁気刺激装置の開発
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高木 敏行 東北大学教授 小川 和洋 東北大学教授 内一 哲哉 東北大学教授 田中 真美 東北大学教授 出江 紳一

論文内容要約

現在の本邦は、世界に先駆けて超高齢社会となっている。高齢化は脳血管障害の発生率を高めるため、その後遺症を要因とする嚥下障害患者は年々増加している。嚥下障害は、患者から食の楽しみを奪い QOL (Quality of life) を低下させるだけでなく、誤嚥性肺炎、窒息等を引き起こす死に繋がる障害でもある。肺炎は本邦の死亡原因の 7.2% を占めているが、高齢者の肺炎の 70% 以上が誤嚥に関連しているとされている。効果的な嚥下障害のリハビリテーション手法の開発は、多くの嚥下障害患者の生命の保護と QOL の向上に寄与する重要な課題である。

もっとも一般的な嚥下障害の治療方法は運動療法であるが、近年運動療法に代替する高齢者の負担の小さな治療方法として、電気刺激による方法が着目されている。嚥下に関連する筋の直上表皮に貼りつけた電極からの神経筋電気刺激(neuromuscular electrical stimulation, NMES)によって筋の収縮を誘発し、患者の嚥下機能を回復させる。一方、この NMES による治療においては、電気刺激特有の疼痛や、顎部位の体毛や皮膚のたるみによる接触不良が課題となっている。

著者は、この課題を解決可能な新たな嚥下障害の治療方法として、磁気刺激、特に末梢神経に反復的な刺激を行う rPMS(repetitive magnetic stimulation)を提案している。磁気刺激は、痛みが小さくまた非接触で生体に刺激を与えることが可能な手段であり、電気刺激の課題を解決可能である。著者は、博士課程前期の研究において、U 字形の磁気コアを備えたコイル (U 型コアコイル) を用いて磁気刺激を行うことにより、嚥下関連筋である舌骨上筋群の収縮を強い痛みを伴わずに誘発可能であることを確認している。一方、コイルに流す電流が 1000 A を超える大電流であるためコイルの発熱量が大きく、特に女性のような顎の小さな患者を対象とした小型コイルでは、熱容量が小さいために数十秒程度の短期間の刺激しかできない課題がある。よって、継続的かつ反復的な刺激を可能とする磁気刺激装置の開発が望まれるところである。

本研究では、舌骨上筋群の継続的反复収縮誘発を可能とする磁気刺激装置の開発により、これまでになく効果的なリハビリテーションを嚥下障害の患者に提供することを目指して、下記 3 項目を研究目的としている。

- (1) コンピュータ断層撮影(Computed tomography, CT)により得られた精密な人体頭部モデルを用いた数値解

析により、U型コアコイルの舌骨上筋群収縮誘発に対する適性を確認するとともに、骨構造を含むモデルと骨構造を含まないモデルの解析結果を比較し、末梢神経磁気刺激の電磁界解析において骨構造を含むモデルを用いることの重要性を評価する。

(2) 女性や高齢者に多い顎の小さな患者にも使用可能であり、尚且つ実際のリハビリテーション現場にて求められる「継続的かつ反復的な磁気刺激」を実施可能な磁気刺激装置を開発する。具体的には、人体に接触する部位の温度を 43℃未満に維持しながら、15 分以内に 6,000 発の磁気刺激が可能な磁気刺激装置の開発を行う。

(3) 舌骨上下筋群の嚥下時の筋電位を評価することにより、より効果的なリハビリテーションを提供可能な「バイオフィードバックを付加した舌骨上筋群の訓練」の実現可能性について議論し、その結果に基づきバイオフィードバックを用いたリハビリテーションを可能とする磁気刺激システムの構築を行う。

本論文は6つの章により構成されている。

第1章は緒論である。本研究の研究背景を説明するとともに、現在の嚥下障害リハビリテーション用磁気刺激装置の開発課題を抽出している。

第2章では、開発した磁気刺激装置を用いた刺激時における人体内部の電磁気的現象を正確に記述することを目的として、CTにより得られた精密な人体頭部モデルを用いた数値解析を実施している。本章では、CTにより得られたDICOMデータより、精密な人体頭部モデルを作成する手法およびそのモデルを用いた数値解析を実施するプロセスが確立され、U型コアコイルおよび円形コイルにより人体頭部内部に誘導される電流密度の解析が実施されている。解析の結果、U型コアコイルによる磁気刺激では、「顎下中腹を横断する強い電流密度が誘導されており、この領域に位置する舌骨上筋群のモーターポイントをまんべんなく刺激することが可能であること」および「下顎骨髄腔内部の電流密度はかなり低く、髄腔を走行する下歯槽神経が刺激される可能性は低いこと」が示されている。このことは、U型コアコイルが、舌骨上筋群収縮誘発に対して適性をもっていることを示している。また、骨構造を持つモデルと骨構造のないモデルを用いた解析結果を比較することにより、骨構造が解析結果に与える影響について評価が行われ、骨構造の存在により深さ 20mm の地点においては、電流密度が最大 29%低下すること等が示されている。末梢神経刺激における電磁界解析においては、骨構造の有無が、特に骨構造の近傍において、解析結果に影響を与えることが示され、関心のある領域が骨構造に囲まれている場合や髄腔内部の電流密度が重要視される場合は、積極的に骨構造を含んだモデルによる数値解析を実施することが望ましいと考えられる。

第3章では、数値解析により磁気刺激コイルの導体部分における発熱メカニズムを明らかにするとともに、その発熱の抑制方法について検討を行い、検討の結果得られた発熱抑制方法の効果を実験により確認している。従来のコイル構造である平板状導体を用いたU字コアコイル（シングルコイル）を導体構造まで含む三次元モデルで作成し、その導体内部における磁気刺激時における電流密度分布を数値解析することにより、発熱の原因がコ

アから発生する磁束によりコイル導体内部に誘導される渦電流であることを明らかにしている。また、異なる2種類のコイル間接続方法（ストレート接続およびクロス接続）を用いた並列コイル（導体を分割したコイル）についても導体内部の電流密度の数値解析を行い、クロス接続とした並列コイルでは、従来コイルであるシングルコイルに比較して発熱が52%抑制されることが確認された。また、解析を行ったコイルは、実際に製作され、磁気刺激時におけるコイル表面の温度上昇がサーモグラフィーと熱電対によって測定されている。クロス接続の並列コイル(Parallel(Cross))を用いた場合、大幅に発熱が抑制され、表面温度が30℃から80℃に達するまでに要するパルス数は従来コイル(Single)の3倍以上となることが確認された。同様の結果がサーモグラフィーを用いた測定でも得られている。解析および実験により、クロス接続の並列コイルを用いた場合、磁気刺激時におけるコイルからの発熱が大幅に抑制されることが確認された。

第4章では、磁気コアの構造および形状を数値解析と試験によって検討し、さらに空冷機構を搭載することによって、継続的かつ反復的な磁気刺激が可能な磁気刺激装置の開発を行っている。第3章にて行った研究により、磁気刺激時におけるコイルからの発熱を大きく抑制することが可能となったが、一方、その後の開発過程においてコアからの発熱も無視できないことが確認された。そこでコアの発熱抑制を目的として、数値解析と試作コアを用いた実験を実施し、磁気コアを磁極間内面に適切な傾きを持たせた積層コアとすることによって、下顎深部の刺激を可能とし、かつ発熱を抑制することが可能であることが明らかとなった。また、この磁極間内面の傾きによって、コイルとコア間に冷風を通す隙間を確保することが可能となった。このコアに第3章にて開発したクロス接続の並列コイルと空冷用のファンを組み合わせ、コアとコイル間の間隙に冷風を通す構造とすることで、空冷式磁気刺激コイルを試作した。その温度上昇の程度についてサーモグラフィーで評価を行ったところ、6分40秒の間に、コイル表面の温度が43℃を超える事なく、6000発の磁気パルスの発生が可能であることが確認された。本章の研究により開発された磁気刺激装置により、継続的かつ反復的な磁気刺激によるリハビリテーションを嚥下障害患者に提供することが可能となった。

第5章では、嚥下動作時の舌骨上下筋群の筋電位の時系列解析により、舌骨下筋群の筋電位をトリガとしたバイオフィードバックを付加した磁気刺激の可能性を評価するとともに、実際に舌骨下筋群の筋電位をトリガとした磁気刺激システムの構築を行っている。近年、患者の運動努力や運動意図を検知し、その意図に沿った物理的刺激または機械的な動きを患者の身体にフィードバックすることによりリハビリテーションの効果をより高める「バイオフィードバック」を用いたリハビリテーションが頻繁に行われている。同様に嚥下動作に同期した舌骨上筋群への磁気刺激を行うことができれば、より質の高い嚥下障害のリハビリテーションを患者に提供できる。嚥下動作と同期した磁気刺激の方法として筋電位をトリガとする方法があるが、筋電位電極の貼付部位には磁気刺激を行うことはできない。そこで、嚥下時に舌骨上筋群と連動して収縮する舌骨下筋群の筋電位をトリガとして磁気刺激を行うシステムについて、嚥下時の舌骨上下筋群の嚥下時の筋電位を評価することにより、その実現可能性について検討を行った。検討の結果、嚥下動作時において、舌骨下筋群の筋電波形が舌骨上筋群の活動時間

の初期($22.5 \pm 19.6\%$)に立ち上がることで、また、微分処理と二乗平均平方処理を筋活動検出アルゴリズムに組み込むことにより、その検出のための時間を考慮しても舌骨上筋群の活動時間の前半($41.5 \pm 21.7\%$)に磁気刺激を入れることが可能であることが確認された。この筋電位評価で得られた筋電位検出アルゴリズムをベースとして、実際に生体の筋電位をトリガとすることが可能な磁気刺激システムが構築された。その外観を Fig. 1 に示す。また、このシステムにより実際に嚥下動作に同期した磁気刺激が可能であることが確認された。

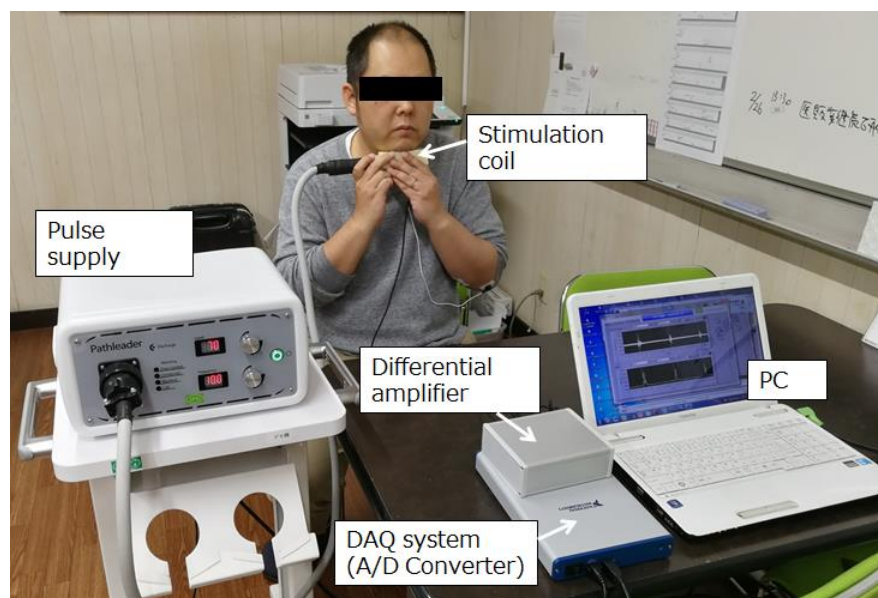


Fig. 1 Constructed EMG-Triggered magnetic stimulation system.

第6章は、結論であり、本論文を総括している。

本研究の結果、下記項目が達成された。

(1)精密頭部モデルを用いた数値解析においても、U型コアコイルが舌骨上筋群収縮誘発に対して適性をもっていることが確認された。また、骨構造の有無が、特に骨構造の近傍において、刺激の動態に強く影響することが確認された。

(2) クロス結線の並列コイルと形状を改良した磁気コアに空冷ファンを組み合わせることで、患者との接触面の温度を安全な温度に維持しながら、6分40秒で6000発の磁気刺激が実施可能となった。

(3) 舌骨上下筋群の嚥下時の筋電位を評価し、舌骨上筋群の活動時間の前半($41.5 \pm 21.7\%$)に磁気刺激を入れることが可能であることが確認され、実際に筋電位をトリガとした刺激が可能な磁気刺激システムが構築された。

本研究の成果として開発された磁気刺激装置は、嚥下障害患者に対する短時間での継続的かつ反復的な磁気刺激の実施を可能とし、加えてバイオフィードバックを用いた嚥下活動に同期した刺激も実施可能であり、より効果的なリハビリテーションを嚥下障害患者に提供するものである。また、この磁気刺激装置の有効性は、精密な人体頭部モデルを用いた数値解析により検証され、また医療現場においては健常成人を対象とした臨床試験によ

っても確認されている。

　　今後は、この開発された機器の医療機器認証を取得し製品化を目指すとともに、嚥下障害患者を被験者とした臨床試験により、そのリハビリテーション効果を評価する。